ИЗМЕРЕНИЯ СОЛНЦА И АКТ ИЗМЕРЕНИЯ

В. А. Котов

© 2009

Научно-исследовательский институт “Крымская астрофизическая обсерватория”
98409 Крым, п. Научный
e-mail: vkotov@crao.crimea.ua

При измерениях общего магнитного поля (ОМП) Солнца его фотосфера выступает как магнитный “стандарт” для разных магнитографов. Различия показаний последних, однако, часто выходят за рамки погрешностей. ОМП распределено нормально по данным магнитографов КрАО, Иркутска и Китт-Пик; распределения же Маунт-Уилсон, Стэнфорда и Бирменгема экспоненциальные. Сделан вывод, что аномальность вызвана техническими особенностями некоторых инструментов. Физически же она обусловлена квантовой природой света – нелокальностью и неразличимостью фотонов (“инструмент неизбежно меняет результат”).

ВВЕДЕНИЕ

Измерения магнитного поля Солнца, выполненные разными магнитографами или одним и тем же магнитографом, но по разным спектральным линиям, часто расходятся. Это – δ-эффект, причины которого не установлены. Расхождения имеют место и при измерениях общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды. Большинство исследователей убеждено, что расхождения вызваны ошибками измерений, а также т. н. эффектом “насыщения” магнитографа в элементах “тонкой” структуры фотосферы напряжённостью 1.0–1.5 кГс [1, 4].

Измерения ОМП (продольной напряжённости B) Солнца без пространственного разрешения могут способствовать решению проблемы: при таких наблюдениях видимая полусфера выступает как магнитный “стандарт” для разных инструментов, регистрирующих слабую поляризацию в крыльях линий. Поэтому можно анализировать большой и однородный статистический материал – “одновременные”, т. е. выполненные разными инструментами в одни и те же UT-сутки, измерения эффекта Зеемана *всей* видимой полусферы Солнца.

ОМП: 1968–2008 гг.

Измерения ОМП за 41 год выполнены в шести обсерваториях – см. табл. 1, где N – число суточных B, Δ – типичная ошибка отдельного измерения, S – стандартное отклонение, $<B>$ – среднее. (В КрАО с 2001 г. по 2008 г. поле измерялось по двум линиям Fe I, λ524.7 и λ525.0 нм, с факторами Ланде $g = 2$ и 3 соответственно.) С уровнем значимости $2\sigma - 3\sigma$ среднее некоторых массивов отличается от нуля, но это можно приписать ограниченности числа измерений, скважности и неучтённому сдвигу нуля. Эти средние по модулю достаточно малы и не играют роли при рассмотрении гистограмм. Никакие поправочные коэффициенты не вводились. Положительные B отвечают N-полярности, в скобках – стандартные ошибки для последних цифр. В каждой обсерватории применялись специальные процедуры контроля нуля инструмента.

Таблица 1. Измерения ОМП, 1968–2008 гг.

Обсерватория	Годы	Линия, нм	N	Δ, Гс	S, Гс	$<B>$, Гс
Крым	1968–2008	Fe I λ525.02	2784	0.11	0.64	−0.047(13)
Крым	2001–2008	Fe I λ524.71	802	0.14	0.66	−0.098(24)
Маунт-Уилсон	1970–1982	Fe I λ525.02	2457	0.07	0.67	+0.002(14)
Стэнфорд	1975–2008	"	9986	0.05	0.40	+0.002(04)
Саяны	1982–1993	"	313	0.05	0.77	−0.101(44)
Сазерлэнд	1992–2001	K I λ769.90	1988	0.01	0.43	+0.027(10)
Китт-Пик	2003–2007	Fe I λ630.15	778	0.01	0.60	+0.011(22)

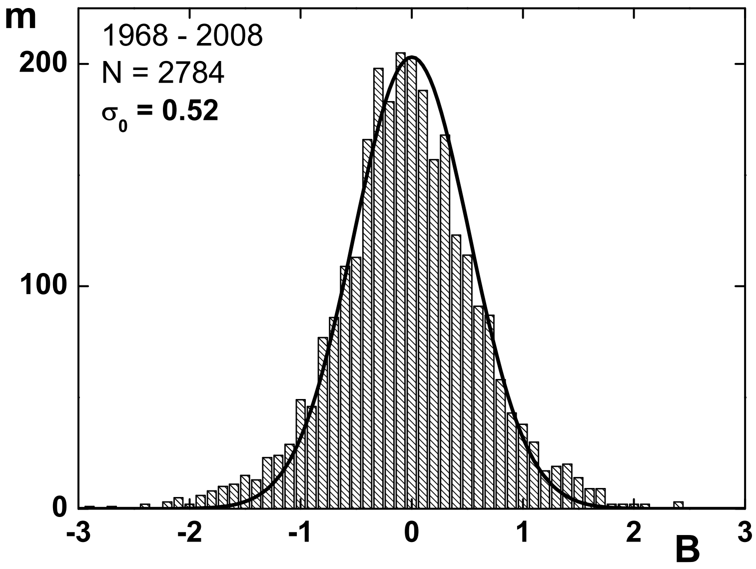

Рис. 1. Гистограмма ОМП по данным КрАО за 1968–2008 гг., $N = 2784$, $\lambda 525.0$. Гладкой линией показана гауссовская кривая со стандартом $\sigma_0 = 0.52$ Гс

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРЫМА И САЯН

В любом физическом опыте, если нет аномальности прибора, ошибки – или отклонения от среднего – распределяются нормально.

Пусть наблюдаем гипотетическое Солнце: постоянное во времени, но магнитное, и с помощью линейного прибора (таковы все магнитографы при регистрации ОМП). Тогда можно утверждать, что *измеряемое* ОМП будет обладать нормальным распределением шумов около среднего. На деле реальный "стандарт" Солнце изменяет B из-за вращения секторной структуры, цикла и эволюции фоновых полей. Для всей серии ОМП такие вариации представляются как шумы и, таким образом, могут только увеличить рассеяние около среднего. Остаётся классическое соображение: измеренное ОМП должно обладать нормальным, гауссовским, распределением.

На рис. 1 представлено распределение $m(B)$ КрАО за 1968–2008 гг. ($N = 2784$, линия $\lambda 525.0$). Методом наименьших квадратов (МНК) оно хорошо аппроксимируется нормальной кривой

$$f_1(B) \sim e^{-B^2/2\sigma_0^2} \quad (1)$$

со стандартом $\sigma_0 = 0.52$ Гс (крымских данных по линии $\lambda 524.7$ пока недостаточно, чтобы судить о типе распределения).

Распределение Саянской солнечной обсерватории (ССО, Институт солнечно-земной физики, Иркутск) также близко к нормальному с параметром $\sigma_0 = 0.83$ Гс, что несколько превышает стандартное отклонение ряда $S = 0.77$ Гс [5]. По критерию χ^2 вывод об отличии распределений КрАО и ССО от нормального отвергается на уровне значимости 1σ.

МАУНТ-УИЛСОН И СТЭНФОРД

На рис. 2 приведено распределение Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (СОУ, Стэнфорд). Оно аппроксимировано МНК-кривой, отвечающей нормированному на максимум распределению плотности вероятности типа

$$f_2(B) \sim e^{-|B|/\tau} \quad (2)$$

с характеристическим параметром экспоненты, или "затухания", $\tau = 0.30$ Гс. Распределение обсерватории Маунт-Уилсон (ОМУ), также не подчиняющееся нормальному закону, близко к (2) с $\tau = 0.52$ Гс [5].

Странное различие распределений КрАО–ССО и ОМУ–СОУ, казалось бы, может быть обусловлено большими погрешностями крымских и саянских измерений по сравнению с калифорнийскими

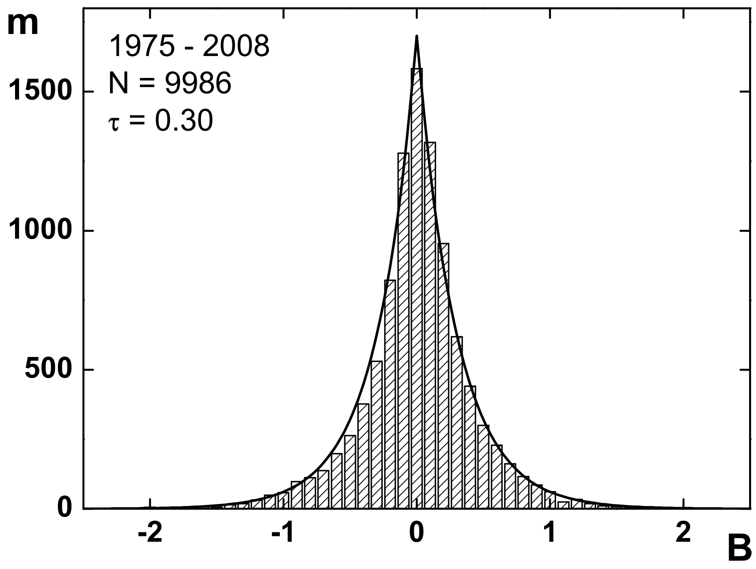

Рис. 2. Распределение стэнфордских данных 1975–2008 гг. ($N = 9986$; самое большое значение, $B = 3.44$ Гс, не показано). Кривая линия – распределение $\sim e^{-|B|/\tau}$, где $\tau = 0.30$ Гс

погрешностями. Уменьшение же последних следует тогда связать с повышенным световым потоком в ОМУ и СОУ, где оба спектрографа снабжены светоделителями (*image-clicers*). Детальный анализ [3, 5] показал, однако, что расхождения двух пар распределений различиями ошибок, или чувствительностей приборов, объяснить нельзя. Снова противоречие: мы знаем *a priori*, что истинное распределение ОМП нормальное, но оно сходно с "плохими" распределениями КрАО и ССО и отличается от "хороших" экспоненциальных распределений ОМУ и СОУ, имеющих "наиболее точные" инструменты.

Мы полагаем, что аномальность ОМУ–СОУ связана с квантовыми свойствами света и влиянием прибора, или самого *акта измерения*, на состояние фотонов и результат. Источником аномальности, или квантовой нелинейности, может являться светоделитель, создающий в спектрографе несколько "независимых" световых пучков (результирующая поляризация пучков регистрируется общим детектором).

БИРМИНГЕМ И КИТТ-ПИК

Распределение *BiSON* (обсерватория Сазерленд, Южная Африка, измерения Бирмингемского университета) на рис. 3 тоже экспоненциальное с $\tau = 0.30$ Гс. Причину этой аномальности мы видим также в квантовых свойствах света: в неизбежном для метода атомной резонансной спектроскопии, применяемом в Бирмингеме, взаимодействии солнечных фотонов с лабораторными (свечение паров калия), что изменяет поляризацию при "слиянии" неразличимых фотонов. Интересно, что S и τ – практически одинаковые для Стэнфорда и Бирмингема.

Распределение Китт-Пик (данные *SOLIS–VSM*, рис. 4) грубо можно принять близким к нормальному с $\sigma_0 = 0.45$ Гс. Асимметрию и отклонение от нормальности следует приписать ограниченности данных (они находятся сейчас в стадии корректировки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами выдвинуто предположение [3, 5], что существенная часть расхождений обусловлена квантовой, статистической природой света. При измерениях необходимо учитывать нелокальную природу фотонов и эффект их неразличимости ("перепутанность", *entanglement*, и их "слияние", *coalescence*), доказанные на рубеже XXI в. лабораторными экспериментами [2, 6]. Причина в том, что природа фотона до конца ещё не раскрыта. Клышко [2], например, подчёркивал, что в физике до сих пор отсутствует последовательная теория фотона, часто подменяемая – порой на уровне семантики – различными, порой нечёткими, трактовками его свойств (отсюда такие понятия, как дуализм фотона, квантовая нелокальность, волновой цуг или пакет, квант действия, сцепление, слияние, суперпозиция состояний и др.).

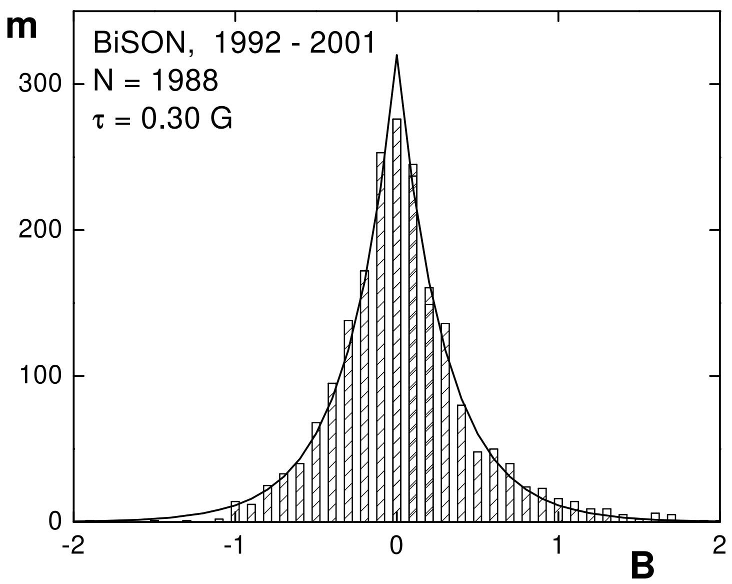

Рис. 3. То же, что на рис. 2, для данных *BiSON*: 1992–2001 гг., $N = 1988$, $\tau = 0.30$ Гс

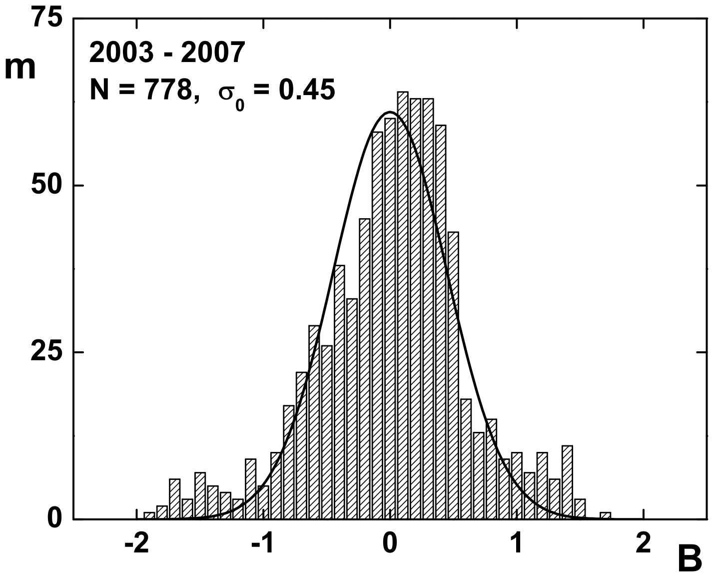

Рис. 4. То же, что на рис. 1, для Китт-Пик (данные *SOLIS–VSM*, 2003–2007 гг., $N = 778$, $\sigma_0 = 0.45$ Гс)

При рассмотрении образования линии в замагниченной атмосфере Солнца и акта регистрации фотона, действительно, игнорируется квантовая природа света, – кроме, конечно, существования самих квантов энергии, зеемановского расщепления уровней атома и поляризации фотонов. На деле же определёнными квантовыми эффектами пренебрегать нельзя. В частности, сцеплением и неразличимостью фотонов, корни которых вскрыты физиками при проверке известного эффекта Эйнштейна–Подольского–Розена, ЭПР. О нём утверждалось в основах квантовой механики ещё на заре её становления, и в нём сильно сомневался и не мог его допустить сам Эйнштейн.

Сейчас квантовое “действие фотонов-призраков” на расстоянии доказано экспериментально, что явилось триумфом квантовой теории. А именно, доказан ЭПР-парадокс: между разнесёнными в пространстве квантовыми системами существует связь. Недавно Сантори и др. [6] доказали экспериментально и эффект “слияния” (объединения, *coalescence*) фотонов, причём не только “близнецов”, т. е. необязательно когерентных фотонов, созданных одновременно. При совпадении частот и квантовых мод, характеризующих поляризацию, фотоны становятся неразличимыми. Такие последовательные фотоны, сливаясь, интерферируют особым образом, вместе отражаясь от поверхности оптического разделителя или вместе проходя сквозь него. Слияние имеет место и для совершенно независимых фотонов, излучённых последовательно и имеющих близкие частоты; т. е. эффект наблюдается и для фотонов, которые до встречи “ничего не знали” друг о друге.

В магнитографе применяются электро-оптический модулятор и поляризатор – главные устройства для регистрации поляризации фотонов. Поэтому в соответствии с квантовыми эффектами результат искажается прибором. А вся суть – в выражении Клышко [2]: “Фотон является фотоном, лишь если это – зарегистрированный фотон”. Другими словами, квантовое поле неразделимо на априорное (генерация) и апостериорное (детектирование) состояния. Дело, по-видимому, в не решённом до сих пор парадоксе Белла и не постигнутой до конца природе фотона.

Из-за квантовых эффектов нелокальности/неразличимости фотонов измерение само влияет на их состояние. Результат будет зависеть от устройства инструмента, метода детектирования и поляризации света, т. е. и от фактического поля и его распределения на Солнце. Эти факторы, приводящие к “хаосу”, трудно или порой невозможно учесть на практике. Квантовой природе света и следует приписать существенную часть “устойчивого беспорядка” и расхождений результатов при измерениях ОМП. То же касается измерений поля по разным линиям; но определённый вклад в расхождения, конечно, может вносить и известный эффект инструментального насыщения, вызванный тонкой структурой поля.

Принимая наше объяснение пока как гипотезу, вопрос об истинной причине отклонений распределений ОМУ, СОУ и *BiSON* от нормального следует считать открытым. Поражает их близость к функции $\sim\ e^{-|B|/\tau}$, характеризующей, например, радиоактивный распад, а также эффект “слияния” фотонов, доказанный в лаборатории [6]. Последнее поможет в будущем лучше понять физическую природу аномалии.

Анализ ОМП показывает, что измерение слабой поляризации нельзя отделять от физики света и *акта регистрации*. Нелокальность (слияние, неразличимость, перепутанность, *entanglement*) фотонов – источник внутренних шумов системы “свет–инструмент” и статистических искажений B по измерениям с разными приборами для “магнитного эталона” Солнца. Эффект должен учитываться и при наблюдениях магнитных и химически пекулярных звёзд, а также при моделировании переноса излучения и звёздных атмосфер. Что касается измерений магнитного поля Солнца, то наилучшее приближение к истинному ОМП и согласию результатов даёт, по-видимому, простое усреднение многих независимых “актов” измерения.

Автор благодарит В. И. Ханейчука за активное участие в измерениях ОМП и разработку программ и Н. П. Русака за обеспечение работы телескопа БСТ–1 и магнитографа. Особое спасибо всем исследователям шести обсерваторий, кто так или иначе принимает/принимал участие в измерениях ОМП.

[1] *Демидов М. Л., Григорьев В. М., Пещеров В. С.* Стоксометрические наблюдения общего магнитного поля Солнца: возможные проявления мелкомасштабных магнитных полей // Астрон. журн. – 2005. – **82**, № 7. – С. 628–636.

[2] *Клышко Д. Н.* Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты // Успехи физ. наук. – 1994. – **164**, № 11. – С. 1187–1214.

[3] *Котов В. А.* Об одном парадоксе измерений магнитного поля Солнца // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 2008. – **104**, № 1. – С. 109–130.

[4] *Howard R., Stenflo J. O.* On the filamentary nature of solar magnetic fields // Solar Phys. – 1972. – **22**, N 2. – P. 402–417.

[5] *Kotov V. A.* Daily measurements of the mean magnetic field of the Sun, 1968–2001: Anomalous distribution? // Astron. and Astrophys. – 2003. – **402**, N 3. – P. 1145–1150.

[6] *Santori C., Fattal D., Vučković J., et al.* Indistinguishable photons from a single-photon device // Nature. – 2002. – **419**, N 6907. – P. 594–597.